

文章编号: 1000-7032(2021)06-0871-09

# 具有叠层超薄膜结构的高性能有机晶体管氨气传感器

陈 晗, 胡 琪, 邱龙臻, 王晓鸿\*

(合肥工业大学 光电技术研究院, 特种显示技术国家工程实验室,  
现代显示技术省部共建国家重点实验室培育基地, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 研究了基于给-受体共轭聚合物双(2-氧代二氢吡啶-3-亚基)-苯并二呋喃-二酮和联噻吩(PBIBDF-BT)超薄膜叠层晶体管的电学性能及氨气传感特性。使用相分离方法以及转移-刻蚀步骤制备了不同堆叠层数的PBIBDF-BT超薄膜。系统地研究了PBIBDF-BT超薄膜堆叠层数与器件性能的关系。实验结果表明,单层PBIBDF-BT超薄膜器件对氨气具有良好的传感性能,电学性能较差。超薄膜叠层能够有效提高传感器的电学性能,随着超薄膜叠层数量的增加,器件迁移率不断上升;超薄膜层数增加为3层及更多时迁移率上升趋势变缓,迁移率最大值为 $0.58 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。超薄膜叠层器件氨气传感性能在层数为2层后呈现下降趋势。通过PBIBDF-BT超薄膜叠层方法,制备出在 $1.0 \times 10^{-5}$ 氨气环境下,迁移率为 $0.23 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 、源漏电流变化百分比为90.7%、性能良好的OFET氨气传感器。

**关键词:** 有机超薄膜晶体管; 给体-受体共轭聚合物; 氨气检测; 超薄膜叠层

中图分类号: TP212

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20210107

## High-performance Organic Transistor Ammonia Sensor with Laminated Ultrathin Film Structure

CHEN Han, HU Qi, QIU Long-zhen, WANG Xiao-hong\*

(National Engineering Lab of Special Display Technology, National Key Lab of Advanced Display Technology,  
Academy of Opto-Electronic Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

\* Corresponding Author, E-mail: xhwang11@hfut.edu.cn

**Abstract:** The electrical properties and the ammonia sensing transistor characteristics of ultrathin film laminated transistors based on donor-acceptor conjugated polymer bis(2-oxindole-3-ylidene)-benzodifuran-dione and bithiophene (PBIBDF-BT) were studied. The PBIBDF-BT ultrathin films with different stacking layers were prepared by phase separation method and transfer-etching step. The relationship between the number of PBIBDF-BT ultrathin film stacks and the performance of the device were systematically studied. Experimental results indicate that the single-layer PBIBDF-BT ultrathin film device has good sensing performance for ammonia, but the electrical performance is poor. Ultrathin film stacking can effectively improve the electrical performance of the device. As the number of ultrathin film stacks increases, the device mobility increased. When the number of ultrathin film layers increases to 3 layers or more, the increasing trend of mobility slows down and the maximum mobility is  $0.58 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . The ammonia sensing performance of ultrathin film laminate devices shows a downward trend when the number of layers is 2. Through the PBIBDF-BT

收稿日期: 2021-03-23; 修订日期: 2021-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(51703047); 安徽省杰出青年基金(1808085J03); 中央高校基础研究经费项目(JZ2018HGPB0276, JZ2020YYPY0091)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China(51703047); Distinguished Youth Foundation of Anhui Province(1808085J03); Fundamental Research Funds for the Central Universities(JZ2018HGPB0276, JZ2020YYPY0091)

ultrathin film stacking method, an OFET ammonia gas sensor with good performance was prepared under  $1.0 \times 10^{-5}$  ammonia environment, with a mobility of  $0.23 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , the source-drain current change percentage of 90.7%.

**Key words:** organic ultra-thin film transistor; donor-acceptor conjugated polymer; ammonia gas detection; ultrathin film stack

## 1 引 言

氨气检测对于工业、食品储存、健康检测十分重要。性能良好的传感器可使人们及时对有害气体做出反应,进而降低危害<sup>[1-3]</sup>。有机场效应晶体管(OFET)近些年成为气体传感器领域的研究热点<sup>[4-10]</sup>。OFET 气体传感器的传感能力(感应电流)与目标分析物扩散到 OFET 器件导电沟道的能力直接相关,如何减少目标分析物扩散至器件导电沟道的路径也越来越重要<sup>[11]</sup>。

超薄膜 OFET 传感器因其超薄有机半导体层与气体分子有着更多的接触面积以及能够有效减少气体分子扩散至导电沟道的路径,在性能<sup>[12-15]</sup>、功耗成本<sup>[16-17]</sup>等方面与传统电阻传感器相比具有优势。尽管目前已有许多关于超薄膜 OFET 传感的研究,精确地控制共轭聚合物超薄膜的层数,实现超薄膜从单分子层向多层的转变,对于理解有机场效应晶体管的传感机制、构建性能良好的 OFET 气体传感器具有重要意义。研究人员一般利用 Langmuir-Schäfer (LS) 膜法获得共轭聚合物的单层超薄膜以及多层超薄膜结构。Fabiano 等通过 LS 法研究了 poly{[N, N'-bis(2-octyldecyl)-naphthalene-1, 4, 5, 8-bis(dicarboximide)-2, 6-diyl]-alt-5, 5'-(2, 2'-bithiophene)}<sub>2</sub>, P(NDI2OD-T2) 的单层、多层结构及其对电学性能的影响<sup>[18-20]</sup>。叠层引起器件性能变化的物理机制是单层膜中存在缺陷,增加层数,电荷可以从增加的薄膜中传输,形成导电通路,消除或减小单层中缺陷的影响。Ge 等认为超薄膜经过叠层之后, $\pi$ - $\pi$  距离保持不变,层间间距缩小,分子堆积更加紧密,表现出良好的结晶性质,这可能有利于载流子的传输<sup>[21]</sup>。然而,目前关于超薄膜叠层对传感性能影响的研究还相对较少,因此需要系统研究超薄膜叠层结构对器件电学性能以及传感性能的影响。

普通的旋涂成膜方法在工艺上难以制备超

薄膜,相分离方法能够精确控制超薄膜厚度,保证薄膜的均一性,有利于制备超薄膜叠层结构。本文利用相分离方法制备出基于共轭聚合物 PBIBDF-BT/绝缘聚合物的相分离复合薄膜,通过多次重复转移-刻蚀步骤,成功制备出 PBIBDF-BT 超薄膜以及一系列不同层数的超薄膜叠层结构。通过制备 OFET 器件,系统地研究了 PBIBDF-BT 超薄膜堆叠层数与器件性能的关系。通过 PBIBDF-BT 超薄膜叠层这一方法,获得了性能稳定、电学性能以及传感性能良好的 OFET 传感器。

## 2 实 验

### 2.1 PBIBDF-BT 超薄膜叠层及 OFET 制备

首先用 7:3 比例配置的浓硫酸和双氧水将  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  和 Si 基底加热 1.5 h,然后用蒸馏水清洗  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  和 Si 基底并用氮气气流进行干燥。将含氟聚合物 perfluoro(1-butenyl vinyl ether) polymer (Cytop) 以 3 000 r/min 的速度旋涂在  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  基底上,旋涂时间持续 60 s。然后将其放置于热台上,以 180 °C 的温度热处理 15 min。将聚乙烯醇 (PVA) 用作转移薄膜的牺牲层,以 2 000 r/min 的速度旋涂至硅基底上,旋涂时间为 40 s。在室温下以 4 000 r/min 的速度将 PBIBDF-BT (0.5 mg/mL) 和聚苯乙烯 PS (20 mg/mL) 的共混溶液旋涂至 PVA 处理的硅基底上,旋涂时间为 40 s。将复合薄膜缓慢浸入水中,使制备好的 PBIBDF-BT/PS 复合薄膜漂在水面上,然后用经过 Cytop 处理的  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  基底将复合薄膜倒置捞出。用乙酸乙酯蚀刻复合薄膜中的 PS,冲洗三次,此时 PBIBDF-BT 超薄膜留在 Cytop 处理的  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  基底上。重复以上转移刻蚀步骤,获得 PBIBDF-BT 超薄膜叠层(如图 1 所示)。叠层完毕后在 150 °C 氮气环境下退火约 20 min。最后,利用掩膜版在薄膜上沉积金源极和金漏极 ( $W = 1\ 000 \mu\text{m}$ ,  $L = 100 \mu\text{m}$ ),制备并测试 20 ~ 25 个器件。

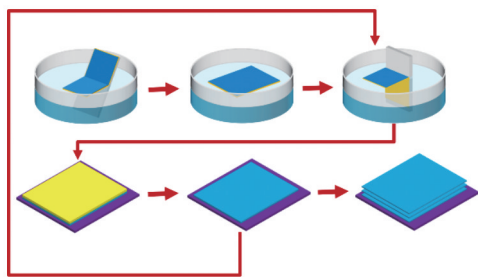


图1 PBIBDF-BT/PS 复合膜反复转移-刻蚀, 得到 PBIBDF-BT 超薄膜叠层。

Fig. 1 Repetitive transfer-etch process of PBIBDF-BT/PS blend films to form PBIBDF-BT multilayers

## 2.2 实验仪器及材料

半导体聚合物 (PBIBDF-BT,  $M_w = 58\ 852\ \text{g/mol}$ ) 的合成见本课题组先前文章<sup>[22-23]</sup>。氯仿 ( $\text{CHCl}_3$ ) 和 PS ( $M_w = 2\ 000\ \text{g/mol}$ ) 购自 Sigma-Aldrich Chemical Co, Cytop 和 PVA 购自 Asahi Glass Co., Ltd. 利用 Keithley 4200 型半导体测试仪在实验室内测量了基于 PBIBDF-BT 超薄膜有机场效应晶体管的电学特性和氨气传感特性。

## 3 结果与讨论

### 3.1 PBIBDF-BT 超薄膜叠层表征及其电学性能

利用原子力显微镜对叠层半导体超薄膜进行表征, 结果如图 2 所示。图 2(a) ~ (d) 分别为叠层数为单层、两层、三层、四层的超薄膜。利用 AFM

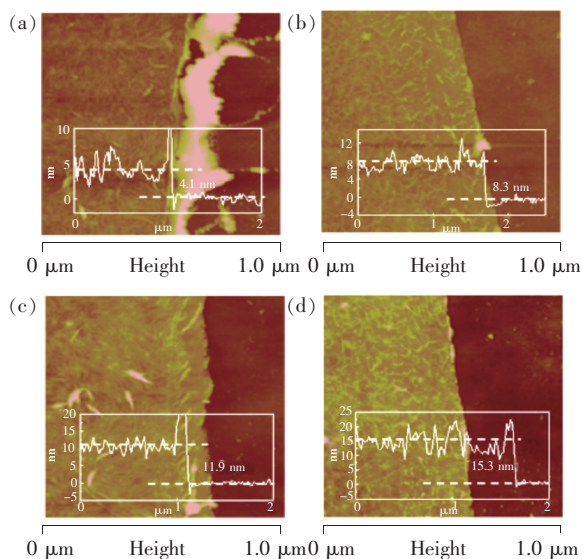


图2 不同对叠层数的 PBIBDF-BT 超薄膜膜厚分析。(a) 单层; (b) 双层; (c) 三层; (d) 四层。

Fig. 2 Profile analysis of PBIBDF-BT ultrathin films with different layer numbers. (a) 1 layer. (b) 2 layers. (c) 3 layers. (d) 4 layers.

软件计算不同叠层数超薄膜厚度, 随着叠层数量的增加, 叠层超薄膜的厚度分别为 4.1, 8.3, 11.9, 15.3 nm。

对制备的一系列 PBIBDF-BT 叠层超薄膜的电学特性进行研究, 将叠层的半导体超薄膜上蒸镀一层金电极, 制备底栅顶接触的 OFET 器件。饱和状态下工作的 OFET 器件其迁移率由  $|I_{\text{DS}}|^{1/2}$  和  $V_G$  作图的最大斜率所得, 计算过程如公式(1)所示:

$$I_{\text{DS}} = \frac{WC_i}{2L} \mu (V_G - V_T)^2, \quad (1)$$

其中  $I_{\text{DS}}$  为漏极电流,  $V_G$  为栅极电压,  $V_T$  为阈值电压,  $C_i$  为单位面积电容,  $L$  和  $W$  分别为导电沟道的长度和宽度。图 3 展示了层数分别为 1 层、2 层、3 层、4 层的超薄膜器件转移特性输出曲线。从图中可以看出单层的超薄膜器件电学性能较低,  $V_G = -80\ \text{V}$  时器件源漏极电流  $I_{\text{DS}} = 3.7 \times 10^{-8}\ \text{A}$ , 迁移率为  $5.29 \times 10^{-4}\ \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当 PBIBDF-BT 超薄膜叠层数增加为两层之后, 器件电流提高为  $I_{\text{DS}} = 1.3 \times 10^{-5}\ \text{A}$ , 器件开态电流得到了明显的提高, 迁移率也相应地提高为  $0.23\ \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 4(a)、(b) 显示了超薄膜层数从 1 层到 4 层变化时 PBIBDF-BT 超薄膜 OFET 器件的迁移率和阈值电压的变化趋势。PBIBDF-BT 超薄膜 OFET 器件迁移率随着层数增加处于上升趋势, 当超薄膜层数达到 3 层以及更多时, 迁移率上升趋势变缓, 叠层超薄膜器件迁移率最大值达到  $0.58\ \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从图 4 可以看出超薄膜叠层能够有效提高器件的场效应性能, 开关比 ( $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ )、阈值电压 ( $V_{\text{th}}$ ) 等 OFET 性能参数表现良好。这证明了叠层能够有效优化超薄膜器件的电学性能。

阈值电压的变化趋势则不同于迁移率变化趋势, 随着超薄膜叠层数量的增加, 阈值电压不断变小, 当超薄膜层数达到 3 层以及更多时阈值电压变化趋于稳定, 维持在  $-5\ \text{V}$  左右。值得注意的是, 由于这种超薄膜 OFET 的导电沟道直接暴露在外界环境下, 高 LUMO 能级 ( $-4.03\ \text{eV}$ )<sup>[22]</sup> 的 PBIBDF-BT 聚合物在空气中形成电子陷阱, 降低了超薄膜 OFET 器件的电子传输性能, 故 PBIBDF-BT 超薄膜叠层器件电子传输性能较差。通过叠层能够使器件获得稳定的空穴传输性能。以上数据充分说明了叠层的优势, 证明了超薄膜叠层

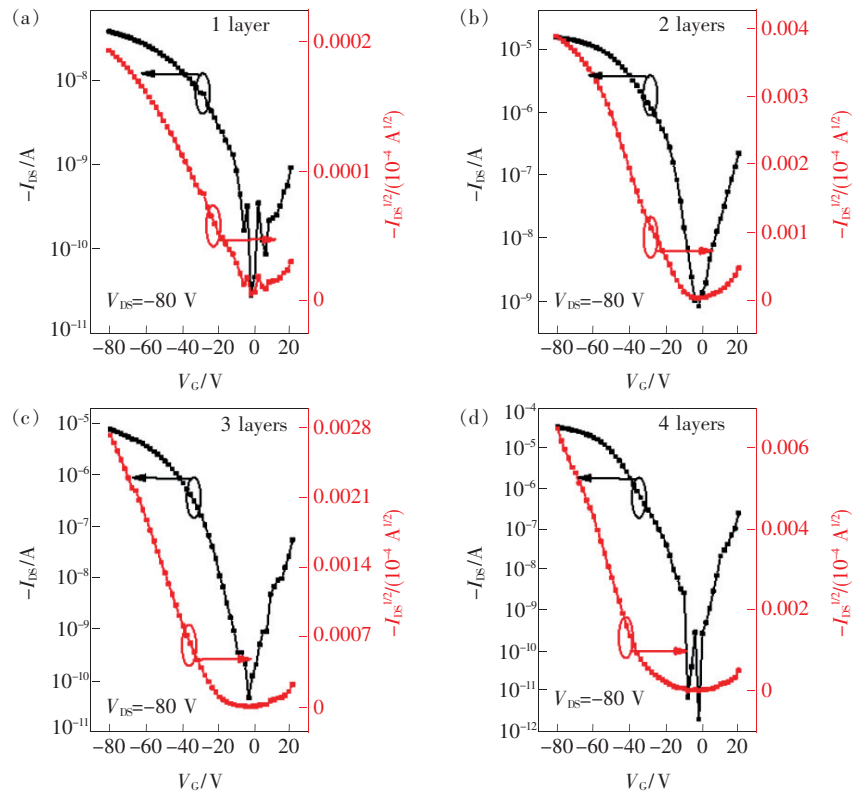


图 3 不同层数的 PBIBDF-BT 超薄膜转移特性曲线

Fig. 3 Transfer curves of PBIBDF-BT ultrathin films with different layer numbers

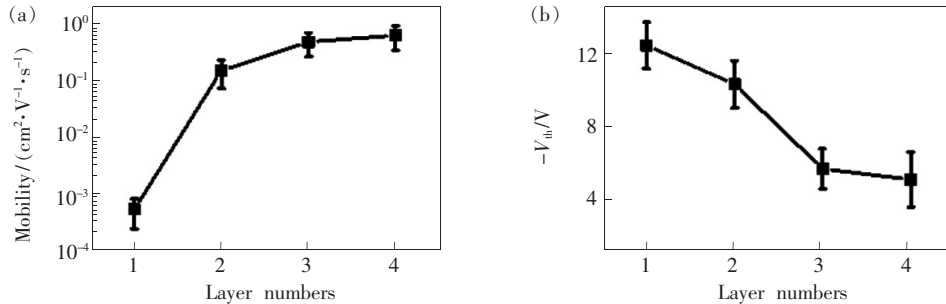


图 4 不同层数 PBIBDF-BT 超薄膜的迁移率变化趋势(a)与阈值电压变化趋势(b)

Fig. 4 Evolution of the field-effect mobilities (a) and the threshold voltages (b) by varying PBIBDF-BT ultrathin film layer numbers

能够为 PBIBDF-BT 半导体载流子提供更为良好的导电通道,超薄膜叠层结构能够优化器件的电学性能。

### 3.2 PBIBDF-BT 超薄膜氨气选择性

对 PBIBDF-BT 超薄膜 OFET 器件进行气体选择性测试,测试装置如图 5 所示,将器件分别暴露于乙醇、丙酮这两种极性分子蒸气和正己烷这种非极性分子蒸气中。利用饱和和蒸气压原理产生有机溶剂蒸气,其浓度在  $5.7 \times 10^{-3} \sim 6.5 \times 10^{-3}$  之间变化。公式(2)给出了有机溶剂蒸气浓度计算方法:

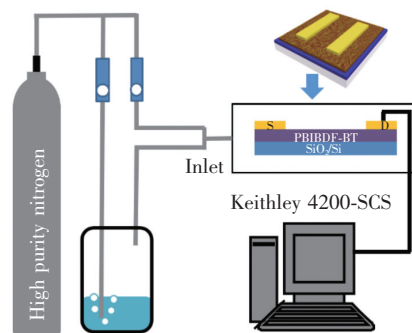


图 5 PBIBDF-BT 超薄膜 OFET 测试装置示意图

Fig. 5 Testing equipment for PBIBDF-BT ultrathin film OFET



$$\lg P = A - \frac{B}{T + C}, \quad (2)$$

其中  $P$  是物质的蒸汽压,  $T$  是温度,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为 Antoine 常数, 可以通过查表得到。氨气的浓度控制为  $1.0 \times 10^{-5}$ 。整个传感测试过程参数如下: 漏极电压恒定为  $-80$  V, 栅极电压为频率为  $0.2$  Hz 的脉冲电压,  $V_{\text{off}} = 0$  V,  $V_{\text{on}} = -60$  V。

图 6 给出了器件选择性测试曲线, 曲线纵坐标

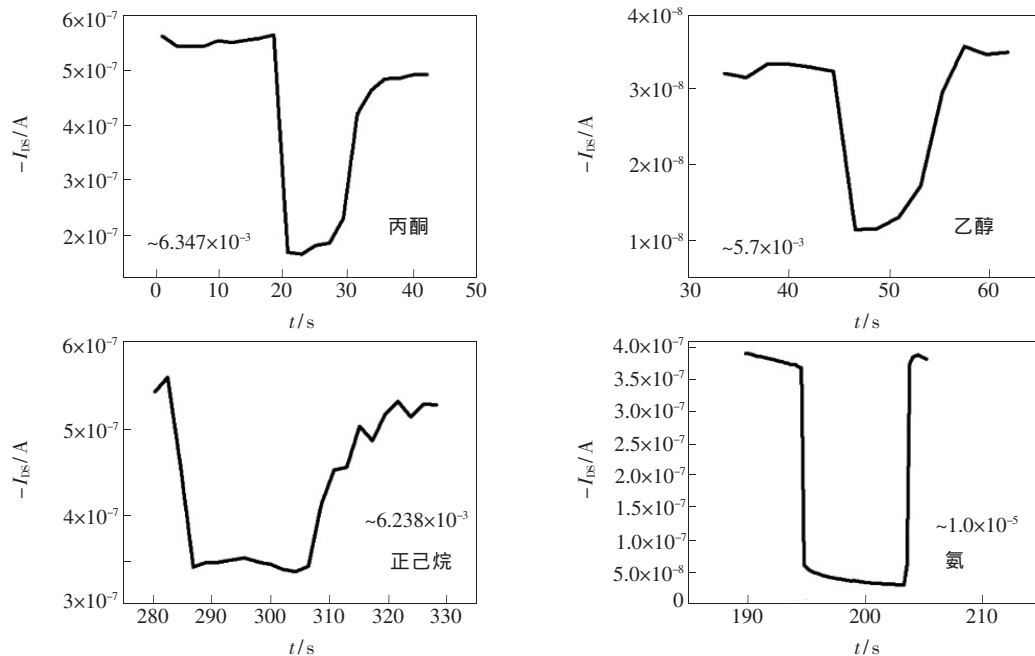


图 6 PBIBDF-BT 超薄膜 OFET 在不同气体分析物下的电流曲线

Fig. 6 Curves of PBIBDF-BT ultrathin film OFET exposed to different gas analytes

### 3.3 PBIBDF-BT 超薄膜叠层器件氨气敏感特性

为了进一步研究超薄膜叠层对氨气传感性能的影响, 将不同超薄膜堆叠层数的 OFET 器件置于不同氨气浓度下进行传感测试。氨气浓度由 0 (纯氮) 依次变化为  $2.0 \times 10^{-6}$ ,  $4.0 \times 10^{-6}$ ,  $6.0 \times 10^{-6}$ ,  $8.0 \times 10^{-6}$ ,  $1.0 \times 10^{-5}$ , 气体浓度通过  $N_2$  和  $NH_3$  的气体流速之比控制。在整个气体测试过程中, 混合气体的流速保持在  $1.5$  L/min 不变, 实验环境湿度控制在  $45\% \sim 55\%$ , 温度控制在  $26$  °C。在不同浓度的氨气条件下, 器件场效应参数变化的百分比 ( $K$ ) 通过公式(3)来定义:

$$K = \left( \frac{X_i - X_0}{X_0} \right) \times 100\%, \quad (3)$$

其中  $K$  表示器件源漏电流变化百分比;  $X_0$  为测量初始值;  $X_i$  表示不同测量条件下的数值,  $i = 1, 2, 3, \dots$ 。

图 7 为不同超薄膜堆叠层数的 OFET 器件在

为器件源漏极电流, 横坐标表示器件测试时间。从图 6 中可以计算出器件在丙酮蒸气下电流降低为初始值的  $65.8\%$ , 在乙醇蒸气下电流降低为初始值的  $46.8\%$ , 正己烷蒸气下电流降低为初始值的  $41.0\%$ , 在氨气下电流降低为初始值的  $88.3\%$ 。结果表明, 器件对  $1.0 \times 10^{-5}$  氨气的电流变化远高于浓度为  $5.7 \times 10^{-3} \sim 6.5 \times 10^{-3}$  的其他有机溶剂蒸气, 基于 PBIBDF-BT 超薄膜的 OFET 对氨具有良好的选择性。

氨气浓度为  $0, 2.0 \times 10^{-6}, 4.0 \times 10^{-6}, 6.0 \times 10^{-6}, 8.0 \times 10^{-6}, 1.0 \times 10^{-5}$  时的转移特性曲线。从图 7 中可以计算出叠层数量为 4 层的 OFET 器件在纯氮环境中源漏极电流  $I_{\text{DS}} = 3.2 \times 10^{-5}$  A, 迁移率为  $0.58 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。随着氨气的浓度增加为  $1.0 \times 10^{-5}$ , 器件的开态电流下降至  $I_{\text{DS}} = 2.1 \times 10^{-5}$  A, 迁移率降低为  $0.3 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 源漏电流变化百分比为  $34.3\%$ 。这种较小的电学性能变化说明 4 层的器件虽然具有良好的电学性能, 但氨气传感能力较差。单层的超薄膜 OFET 器件在纯氮环境中源漏极电流  $I_{\text{DS}} = 3.7 \times 10^{-8}$  A, 迁移率为  $5.29 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。随着氨气浓度增加为  $1.0 \times 10^{-5}$ , 其器件的开态电流下降至  $I_{\text{DS}} = 2.4 \times 10^{-9}$  A, 迁移率降低为  $1.49 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 源漏电流变化为  $93.5\%$ 。这说明单层超薄膜 OFET 器件具备较好的传感性

能,电学性能差。叠层数量为 2 层的 OFET 器件在纯氮环境中源漏极电流  $I_{DS} = 1.3 \times 10^{-5}$  A, 迁移率为  $0.23 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 相较于 1 层器件而言电学性能有着很大的提升。随着氨气浓度增加为

$1.0 \times 10^{-5}$ , 其器件的开态电流  $I_{DS} = 1.2 \times 10^{-6}$  A, 迁移率为  $0.035 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 电流变化为 90.7%。

图 8 展示了超薄膜叠层器件在不同氨气浓度下的迁移率和阈值电压  $V_{th}$ 。随着氨气浓度的增

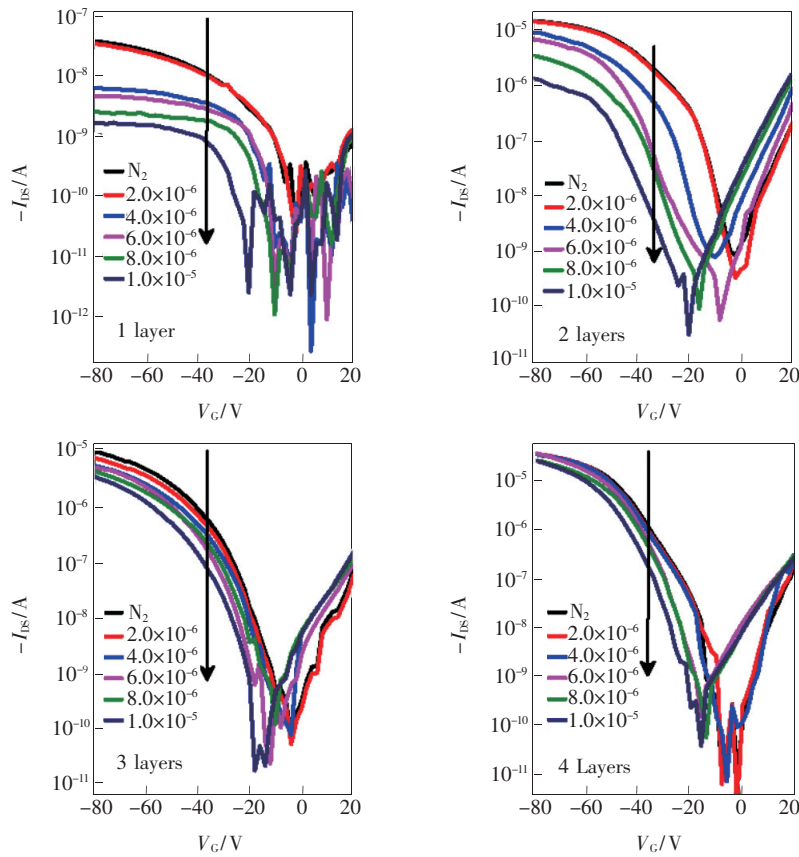


图 7 不同层数的 PBIBDF-BT 超薄膜 OFET 器件在  $2.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-5}$   $\text{NH}_3$  浓度下的转移曲线

Fig. 7 Transfer curves of the OFET devices based on different ultrathin PBIBDF films layer numbers under different  $\text{NH}_3$  concentration from  $2.0 \times 10^{-6}$  to  $1.0 \times 10^{-5}$

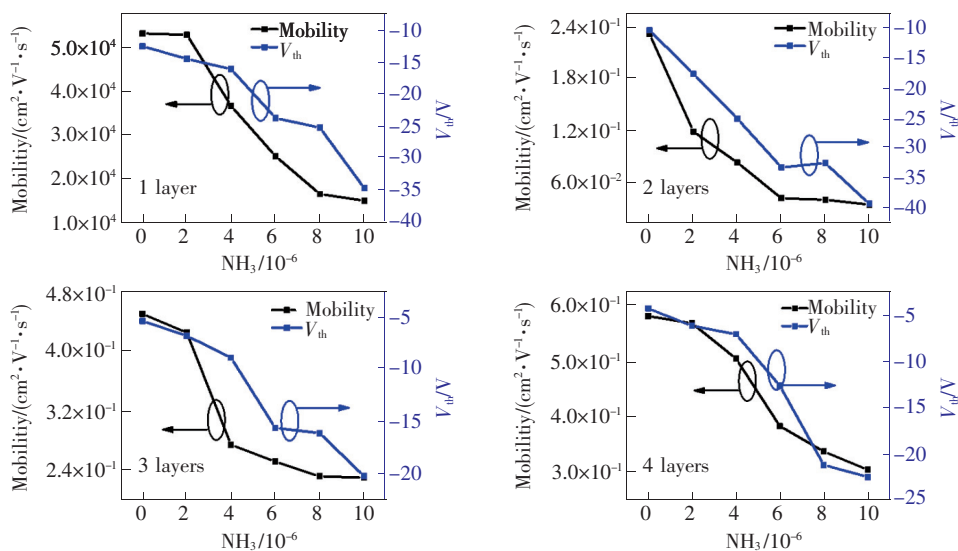


图 8  $\text{NH}_3$  浓度对不同堆叠层数 PBIBDF-BT 超薄膜 OFET 器件迁移率和  $V_{th}$  的影响

Fig. 8 Dependence of mobility and  $V_{th}$  on the  $\text{NH}_3$  concentration of the OFET devices based on different ultrathin PBIBDF films layer numbers

加, 迁移率逐渐降低, 阈值电压  $V_{th}$  的变化趋势与迁移率表现一致。这是由于氨气与半导体之间的电荷偶极效应增加了半导体中的能量扰动数, 而氨气分子在半导体/绝缘层界面上的偶极捕获效应形成了陷阱, 改变了界面处的接触电位所导致的。氨气分子作为电子供体, 在空穴载流子传输过程中充当空穴陷阱吸附空穴载流子, 从而导致

PBIBDF-BT 超薄膜叠层器件源漏电流降低。表 1 总结了不同超薄膜叠层数 OFET 器件在  $NH_3$  为  $1.0 \times 10^{-5}$  下的源漏电流变化百分比及电学性能。从表中可以看出叠层数为 2 层的器件有着良好的电学性能以及传感性能。实验证明了利用叠层方法可以实现对器件传感性能和电学性能的调控, 获得同时具有良好电学性能和良好氨气传感性能的器件。

表 1 不同超薄膜堆叠层数的 OFET 器件电学性能与氨气传感性能

Tab. 1 Electrical performance and ammonia sensing performance of OFET devices with different stack numbers of ultra-thin films

超薄膜 叠层数	迁移率/ ( $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$ )	阈值电压 ( $V_{th}$ )/V	最大开态电流/ A	$1.0 \times 10^{-5}$ 氨气环境 下开态电流/A	源漏电流变化 百分比(K)
1 层	$5.29 \times 10^{-4}$	12.6	$3.7 \times 10^{-8}$	$2.4 \times 10^{-9}$	93.5%
2 层	0.23	10.4	$1.3 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-6}$	90.7%
3 层	0.45	5.6	$1.4 \times 10^{-5}$	$6.5 \times 10^{-6}$	53.2%
4 层	0.58	5	$3.2 \times 10^{-5}$	$2.1 \times 10^{-5}$	34.3%

### 3.4 PBIBDF-BT 超薄膜叠层器件氨气传感稳定性

稳定性对于传感器件而言是一个很重要的评价参数。在恒定漏极电压为  $-80$  V、栅极电压为  $0.2$  Hz、 $V_{off} = 0$  V、 $V_{on} = -60$  V 的条件下对叠层数为 2 层的 OFET 超薄膜器件进行循环测试。图 9 显示了叠层数为 2 层的 OFET 超薄膜器件循环测试曲线, 当器件在高纯度氮气环境下工作时, 源漏极电流 ( $I_{DS}$ ) 处于最大值状态; 当器件暴露于  $1.0 \times 10^{-5}$  浓度的氨气时,  $I_{DS}$  在短时间内显著下降。当氨气被去除后, 电流能够迅速恢复到原来的值, 此时的  $I_{DS}$  缓慢下降是由于器件的偏压不稳定性所导致, 文中实验部分施加频率为  $0.2$  Hz 的栅极电

压能够最大程度上减缓器件的偏压不稳定性。如此重复 5 个周期, 测试曲线基本保持一致。图 9 证明了利用叠层方法制备的 2 层超薄膜 OFET 器件在 5 个周期范围内具有稳定性和重复性。

## 4 结 论

本文通过重复简单的转移-刻蚀方法, 制备了 PBIBDF-BT 超薄膜叠层结构。这些超薄膜叠层具有非常稳定的优异的电学性能, 超薄膜堆叠层数上升, 空穴迁移率能够保持上升趋势且最大值为  $0.58$   $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$ 。研究了 PBIBDF-BT 超薄膜堆叠层数与器件性能的关系, 证明了基于溶液相分离的叠层方法能够有效控制 OFET 的电学性能以及氨气传感性能, 叠层超薄膜结构能够在保证器件传感性能的同时最大程度提高器件的电学性能, 使器件的气敏性和电学稳定性达到最大程度的平衡。当超薄膜叠层数为 2 层时, 制备的有机场效应晶体管迁移率为  $0.23$   $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$ , 源漏电流变化百分比为  $90.7\%$ , 制备了性能稳定、电学性能及氨气传感性能良好的 OFET 传感器。

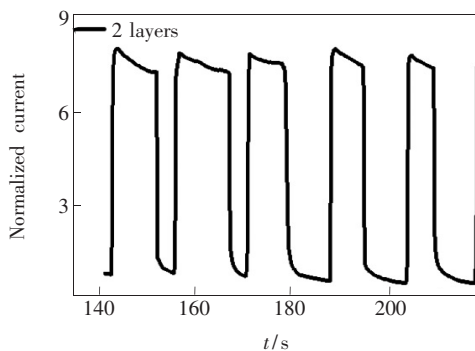


图 9 双层 PBIBDF-BT 超薄膜 OFET 的循环测试性能

Fig. 9 Cycle test performance of the double layers PBIBDF-BT ultrathin films OFET

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:  
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20210107>.

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] YU S H, CHO J, SIM K M, *et al.*. Morphology-driven high-performance polymer transistor-based ammonia gas sensor [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, 8(10):6570-6576.
- [ 2 ] TRUL A A, SIZOV A S, CHEKUSOVA V P, *et al.*. Organosilicon dimer of BTBT as a perspective semiconductor material for toxic gas detection with monolayer organic field-effect transistors [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2018, 6(36):9649-9659.
- [ 3 ] SOMEYA T, DODABALAPUR A, HUANG J, *et al.*. Chemical and physical sensing by organic field-effect transistors and related devices [J]. *Adv. Mater.*, 2010, 22(34):3799-3811.
- [ 4 ] TORSI L, MAGLIULO M, MANOLI K, *et al.*. Organic field-effect transistor sensors: a tutorial review [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2013, 42(22):8612-8628.
- [ 5 ] ZHANG C C, CHEN P L, HU W P. Organic field-effect transistor-based gas sensors [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2015, 44(8):2087-2107.
- [ 6 ] LI H, SHI W, SONG J, *et al.*. Chemical and biomolecule sensing with organic field-effect transistors [J]. *Chem. Rev.*, 2019, 119(1):3-35.
- [ 7 ] ZANG Y P, ZHANG F J, HUANG D Z, *et al.*. Specific and reproducible gas sensors utilizing gas-phase chemical reaction on organic transistors [J]. *Adv. Mater.*, 2014, 26(18):2862-2867.
- [ 8 ] HAN S J, ZHUANG X M, JIANG Y M, *et al.*. Poly(vinyl alcohol) as a gas accumulation layer for an organic field-effect transistor ammonia sensor [J]. *Sens. Actuators B: Chem.*, 2017, 243:1248-1254.
- [ 9 ] YANG Y, ZHANG G X, LUO H W, *et al.*. Highly sensitive thin-film field-effect transistor sensor for ammonia with the DPP-bithiophene conjugated polymer entailing thermally cleavable *tert*-butoxy groups in the side chains [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016, 8(6):3635-3643.
- [ 10 ] YANG G, DI C A, ZHANG G X, *et al.*. Highly sensitive chemical-vapor sensor based on thin-film organic field-effect transistors with benzothiadiazole-fused-tetrathiafulvalene [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2013, 23(13):1671-1676.
- [ 11 ] ZHANG S Q, ZHAO Y W, DU X W, *et al.*. Gas sensors based on nano/microstructured organic field-effect transistors [J]. *Small*, 2019, 15(12):1805196-1-16.
- [ 12 ] GE F, WEI S Y, LIU Z, *et al.*. Tailoring structure and field-effect characteristics of ultrathin conjugated polymer films *via* phase separation [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(11):9602-9611.
- [ 13 ] JI S L, WANG H B, WANG T, *et al.*. A high-performance room-temperature NO<sub>2</sub> sensor based on an ultrathin heterojunction film [J]. *Adv. Mater.*, 2013, 25(12):1755-1760.
- [ 14 ] LIU X L, LUO X G, NAN H Y, *et al.*. Epitaxial ultrathin organic crystals on graphene for high-efficiency phototransistors [J]. *Adv. Mater.*, 2016, 28(26):5200-5205.
- [ 15 ] ZHU Y Y, XIE Q, SUN Y, *et al.*. High-performance NO<sub>2</sub> sensors based on ultrathin heterogeneous interface layers [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2020, 7(1):1901579.
- [ 16 ] CHEN H L, DONG S H, BAI M L, *et al.*. Solution-processable, low-voltage, and high-performance monolayer field-effect transistors with aqueous stability and high sensitivity [J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27(12):2113-2120.
- [ 17 ] CHEN H M, XING X, ZHU M, *et al.*. Low-voltage, high-performance flexible organic field-effect transistors based on ultrathin single-crystal microribbons [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(37):34188-34195.
- [ 18 ] FABIANO S, MUSUMECI C, CHEN Z H, *et al.*. From monolayer to multilayer N-channel polymeric field-effect transistors with precise conformational order [J]. *Adv. Mater.*, 2012, 24(7):951-956.
- [ 19 ] FABIANO S, YOSHIDA H, CHEN Z H, *et al.*. Orientation-dependent electronic structures and charge transport mechanisms in ultrathin polymeric n-channel field-effect transistors [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2013, 5(10):4417-4422.
- [ 20 ] D'INNOCENZO V, LUZIO A, ABDALLA H, *et al.*. Two-dimensional charge transport in molecularly ordered polymer field-effect transistors [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2016, 4(47):11135-11142.
- [ 21 ] GE F, ZHANG C, YAO H B, *et al.*. Precisely controlling the structure of ultrathin semiconducting films by a laminating method for high-performance organic field-effect transistors [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(51):48147-48154.
- [ 22 ] ZHANG G B, LI P, TANG L X, *et al.*. A bis(2-oxindolin-3-ylidene)-benzodifuran-dione containing copolymer for high-



mobility ambipolar transistors [J]. *Chem. Commun.*, 2014,50(24):3180-3183.

- [23] WANG Q H, ZHU M, WU D, *et al.*. Phototransistors based on a donor-acceptor conjugated polymer with a high response speed [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2015,3(41):10734-10741.



陈晗(1996 -), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 2018 年于合肥工业大学获得学士学位, 主要从事有机超薄膜场效应晶体管及其传感特性的研究。

E-mail: 18656096421@sina.cn



王晓鸿(1981 -), 女, 山东临朐人, 博士, 副研究员, 2016 年于合肥工业大学获得博士学位, 主要从事有机共轭聚合物光电材料、有机光电晶体管器件及印刷有机电子器件的研究。

Email: xhwang11@hfut.edu.cn

---

## 关于 2021 年第十届全国氧化锌学术会议延期举办的通知

尊敬的各位专家及关心氧化锌学术发展的业界朋友:

新冠疫情肆虐的当今, 中国澳门特区政府在疫情控制方面做得非常出色, 疫情感染者已经连续 14 个月清零。尽管澳门现在是一座安全健康的城市, 考虑到国际变种新冠病毒的出现, 周边地区存在很大的不确定性。同时, 澳门特别行政区的特殊位置, 目前的通关政策和流程较为复杂且会根据疫情随时调整。根据中国澳门特区政府“常态化疫情防控”的指引, 为了避免因为疫情而不可预测的通关麻烦及保障参会者的身体健康, 经与中国物理学会发光分会领导商议决定, 原定于 2021 年 10 月召开的“第十届全国氧化锌学术会议”将推迟到 2022 年 6 - 7 月举行, 具体时间将在后续的会议通知中发布。

感谢各位对本次氧化锌学术会议的关注和支持!

“第十届全国氧化锌学术会议”

组委会秘书长 王双鹏

联系邮箱: ZnO2021@um.edu.mo

2021 年 5 月 12 日